

L. CARBOGNIN (*) - L. TOSI (*)

SITUAZIONE ALTIMETRICA ATTUALE DEL COMPENSORIO VENEZIANO E I SUOI RIFLESSI SULL'AMBIENTE LAGUNARE (**)

RIASSUNTO

Dopo aver inquadrato il processo della subsidenza che dagli inizi degli anni cinquanta ha interessato in modo particolare il territorio e la città di Venezia per le intensive estrazioni di acque sotterranee, viene effettuata un'analisi di dettaglio dell'attuale situazione altimetrica del comprensorio lagunare.

Lo studio si basa sostanzialmente sulla interpretazione delle altimetrie 1993 confrontate a quelle del 1973 risultanti dalle due rispettive livellazioni di alta-altissima precisione condotte dal C.N.R., I.S.D.G.M. Questi rilievi, partendo da capisaldi stabili di terraferma (nei pressi della pedemontana) arrivano a Mestre, quotano la superficie della città storica con particolare dettaglio, i capisaldi lungo le linee circumlagunari e l'intero cordone litoraneo, chiudendo l'anello attorno alla laguna.

L'analisi relativa all'arco di tempo ventennale ha permesso di confermare la stabilità del territorio accertata definitivamente nel 1975 nella zona industriale e nel centro storico dopo la diversificazione degli approvvigionamenti idrici, di definire con precisione l'andamento della subsidenza naturale, ove l'incidenza antropica è assente, e le aree più fragili del territorio quali quelle litoranee.

SUMMARY

An overview of the land subsidence occurred in the city of Venice and its hinterland in the past decades is first presented.

In particular the responsibility of groundwater withdrawals in the sinking process is briefly described. Man-induced subsidence averaged about 14 cm in the industrial area of Porto Marghera, the center of groundwater pumping, and 10 cm in the city of Venice, from 1952 to 1969. Starting in 1970 a general piezometric improvement began, because of the regulation and diversification of the water

(*) Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, C.N.R., San Polo 1364, 30125 Venezia.

(**) Lavoro svolto nell'ambito del Progetto "Sistema Lagunare Veneziano", Linea di Ricerca 2.7.

supply in the Venetian area and the shutdown of many artesian wells. In Marghera in 1975 only 170 l/sec were withdrawn against the 500 l/sec in 1969.

Concurrently with the recovery of aquifers, the subsidence slowed down until it stopped and in 1975 a land rebound of about 2 cm was recorded in the city of Venice.

In spite of this, one has to keep in mind that the subsidence is mostly irrecoverable and that its effects still remain. Again, since Venice lives on the water, its land elevation must be referred to the mean sea level.

The overall loss in elevation with respect to water level, can be synthesized as the result of three factors: subsidence due to groundwater exploitation, natural subsidence and eustatic rising of sea level. Their joint contribution in the «lowering» of the surface level of Venice with respect to the water level was a total of 22 cm from 1908 to 1975, a determining figure in the recurring phenomenon of «acqua alta» (flooding).

After reviewing the past altimetric situation, an evaluation of the land elevation of the territory is then presented for the last twenty years; a precise regional leveling was in fact carried out in 1993 with the same path of the 1973 one. These surveys include the lines from Treviso (farther inland, the stable origin of the survey) to Mestre (Venice-mainland), from Mestre to the extreme part of the city of Venice and those all around the lagoon edges including the littoral strips.

This 20-year period is quite significant to evaluate the present trend of land subsidence after the cessation of the man-induced phenomenon measured first in 1973 and completely verified in 1975.

In general the 1993 leveling, compared with that of 1973, has pointed out two different behaviors between the zones in the mainland and surroundings of Venice and in the city, which are decidedly stable, and the areas along the extreme edges of the lagoon and littoral where land sinking is still going on even if the rate of subsidence is much lesser than that measured during the previous critical 20-year period.

In order to have a view of the whole area under examination, the map of the 1973-93 contour lines of equal subsidence has been drawn, using the Kriging technique and comparing the height of the 208 bench marks distributed along the leveling lines. Reading these curves it appears even more evident the ground stability of the zones in the mainland, Venice and its surroundings, and the negative trend in soil elevation at the northern and southern extremities of the lagoon's edge and along the littoral. It is noted that the variations in elevation along the lines are progressively decreasing either southward or northward going towards the littorals.

Concerning the littoral strips, one has to bear in mind that these areas are those of more recent formation with respect to the others and that they are close to the rivers' outflows, so the natural compaction of recent deposits is more active here than elsewhere and the rate of natural subsidence is greater.

An ideal line of demarcation between the two above mentioned stable and subsiding lagoon sectors can be outlined.

Particular attention has been devoted to the altimetric situation of Venice because of its importance in the lagoon environment. The city's area (about 8 km²) is covered by a network of 123 bench marks, 65 of which constitute the base for comparison since 1961. A reliable map of subsidence contour lines was drawn by using again the Kriging technique. The pattern of these lines, that are positive almost everywhere, stresses the stability of the historical city's ground elevation. Some of the curves of equal subsidence are closed outlining small negative «bowls». Examination of data indicates that very localized sinkings occur in the more recently filled areas (Marittima-Tronchetto and S. Elena-Giardini) where one can suppose that the process of consolidation is still going on (even though at a very small rate), and in certain areas bordering the principal canals; the latter could be partly linked to an erosion action induced by the speed of water currents along the canals.

By analyzing the temporal piezometric surface variations of the once exploited aquifers, one can confirm that presently the contribution of groundwater withdrawals to land subsidence doesn't exist as a general cause. Only very localized influences can be found.

1. INTRODUZIONE

Il fenomeno di subsidenza per estrazione di fluidi dal sottosuolo è oggi un noto processo che ha avuto negli ultimi decenni una sempre maggiore diffusione anche in Italia. I due casi di subsidenza più noti verificatisi nel nostro Paese sono quelli di Venezia e Ravenna; il primo legato indubbiamente più all'unicità nel mondo della città lagunare che all'entità del suo sprofondamento, il secondo oltre che per l'importanza storica dell'area ravennate, per la gravità di un abbassamento del suolo che in trent'anni ha raggiunto localmente valori di oltre 130 centimetri.

Per entrambe queste città, la causa primaria dell'avvenuta subsidenza va ricercata nello sfruttamento intensivo delle risorse idriche sotterranee.

2. LA SUBSIDENZA DI VENEZIA

La subsidenza di Venezia è un problema studiato in dettaglio sotto tutti gli aspetti, che venne prepotentemente alla luce negli anni sessanta con il ripetersi anomalo di disastrosi eventi di acqua alta. Le immagini delle acque alte a Venezia sono ben note a tutti, come pure il fatto, documentato da numerosi contributi scientifici, del loro succedersi con ampiezze e frequenze sempre più allarmanti.

In quale misura la subsidenza ha contribuito all'esaltazione di questi eventi? Certo che per una città come Venezia che vive sull'acqua, ed è con essa che deve «misurarsi», anche pochi centimetri di abbassamento possono concorrere in modo determinante ad aumentarne la fragilità ambientale.

2.1 La riduzione altimetrica fino al 1973

Si riporta di seguito una sintesi dei risultati degli studi condotti per meglio inquadrare il fenomeno recente.

E' stato dimostrato che l'abbassamento relativo,

rispetto al livello medio del mare, dell'altimetria della città lagunare ha tre componenti: due naturali (subsidenza geologica ed eustatismo) ed una antropica (indotta da estrazione di acque artesiane).

La subsidenza naturale, che ha avuto un'evoluzione differenziale nel tempo e nello spazio, è stata quantificata per l'area di Venezia e il suo entroterra in 0.4 mm/anno dall'inizio del secolo attuale (P. GATTO e L. CARBOGNIN [15]; G. BORTOLAMI et al. [2]). L'incremento eustatico del livello del mare, che si è verificato con tasso annuo di crescita pari a 1.27 mm⁽¹⁾, ha indubbiamente concorso in modo sensibile ad «abbassare» il suolo veneziano sul livello dell'acqua.

La subsidenza indotta dagli sfruttamenti intensivi di acque sotterranee ha contribuito in modo decisamente più marcato ad aggravare la precaria situazione veneziana. L'abbassamento antropico del suolo è stato causato in massima parte dagli emungimenti «a rapina» delle sei falde artesiane che si susseguono fino a 320 m di profondità, sistema acquifero studiato dal C.N.R., I.S.D.G.M. con enorme dettaglio (Fig. 1).

Lo sfruttamento di queste risorse idriche, operato soprattutto per scopi industriali, ebbe inizio con modeste quantità intorno al 1930 e assunse via via proporzioni sempre maggiori divenendo intensivo con il grande sviluppo industriale post bellico negli anni cinquanta.

L'evoluzione dello sfruttamento idrico sotterraneo è ben documentato dall'andamento temporale delle pressioni di strato del quale la fase critica è evidenziata dalla brusca discesa sotto il piano campagna dei livelli piezometrici agli inizi degli anni cinquanta in concomitanza con il boom delle industrie di Porto Marghera (Fig. 2).

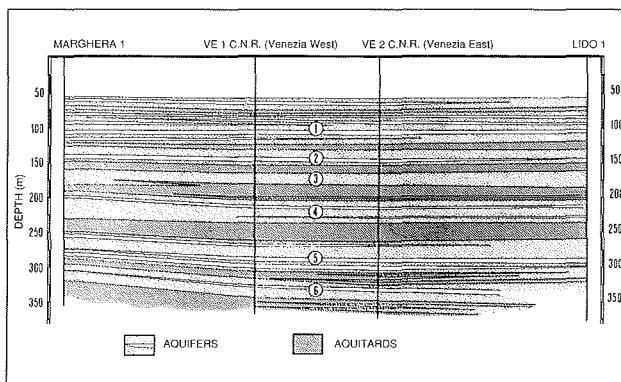


Fig. 1 - Sezione schematica del sistema acquifero veneziano sfruttato (da L. CARBOGNIN et al. [8]).

Schematic representation of the exploited aquifer-aquitard system in the Venetian area (after L. CARBOGNIN et al. [8])

(1) Questo valore calcolato come tasso medio dall'inizio del secolo, prescinde dalle più recenti teorie in fase di studio sulle variazioni del clima e del livello marino legate all'effetto serra.

I livelli piezometrici toccarono i valori minimi nel 1969, quando, in corrispondenza della zona industriale, scesero di quasi 20 m rispetto alle condizioni originali e di oltre 12 m sotto il piano campagna. Il cono di depressione generatosi, con epicentro in Porto Marghera, non solo evidenziava qui il polo degli emungimenti, ma dimostrava che gli effetti dei pompaggi avevano sensibilmente coinvolto anche il centro storico.

Con stretta dipendenza fra causa ed effetto, la depressurizzazione indotta negli acquiferi accelerò il naturale processo di consolidazione dei diaframmi argillosi provocando quindi una subsidenza in superficie che raggiunse i valori massimi a Marghera ma che fu altrettanto grave a Venezia malgrado i dimezzati cali piezometrici qui registrati. In particolare tra il 1968 e il 1969 furono registrati i tassi di subsidenza più critici di 17 mm a Marghera e di 14 mm a Venezia (v. Fig. 5). Anche il litorale di Lido subì un sensibile abbassamento del suolo che toccò i valori più elevati nel 1969 (10 mm/anno) (M. CAPUTO et al. [3]) e che, parallelamente alle locali estrazioni di acque dal sottosuolo, fu parzialmente riferito all'effetto indotto dal richiamo di acque saline nel sottosuolo (L. CARBOGNIN et al. [6]).

In sintesi alla fine degli anni '60 il suolo risultava mediamente abbassato rispetto al 1952 (livellazione di riferimento) di 14 cm a Marghera (dove localmente furono raggiunti i 18 cm) e di oltre 10 cm a Venezia. Questo abbassamento di per sé modesto, creò comunque notevoli preoccupazioni per la già ridotta altimetria della città lagunare sul livello del mare.

Con il drastico ridimensionamento dei consumi iniziato nel 1970, la diversificazione degli approvvigionamenti idrici industriali e la chiusura della maggioranza dei pozzi artesiani, si verificò un rapi-

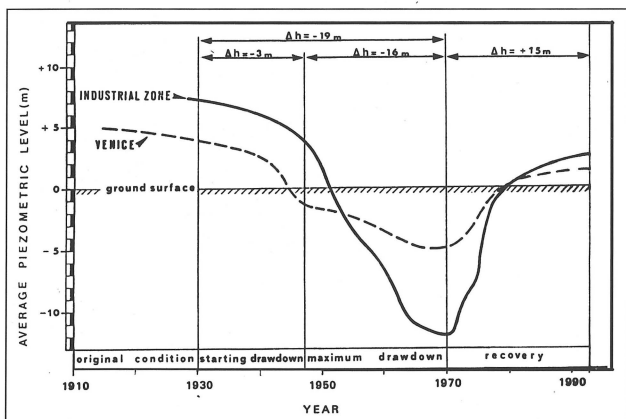


Fig. 2 - Evoluzione della piezometria media a Porto Marghera e a Venezia (quote 1993 da R. DAZZI et al. [10]).

Evolution in time of the average piezometric level in the industrial area and in Venice (1993 piezometric level after R. DAZZI et al. [10]).

do ravvenamento delle falde ed il ritorno nel 1975 dei livelli statici sopra il piano campagna (v. Fig. 2). Il generale miglioramento piezometrico è stato verificato con la normalizzazione del gradiente piezometrico generale e il ritorno ad erogazione spontanea dei pozzi del centro storico e del litorale nonché, successivamente, in terraferma.

La correlazione tra i livelli piezometrici e la subsidenza, rilevata nella fase critica, è stata verificata anche nella successiva fase di recupero. Già la livellazione dell'intero comprensorio condotta nel 1973 dimostrava, dopo la registrata fase di quiescenza, l'arresto dell'abbassamento del suolo, e il successivo rilievo altimetrico della linea di livellazione Conegliano-Venezia effettuato nel 1975 evidenziava un esiguo ma significativo recupero altimetrico. Questo *rebound*, dovuto alla piccola risposta elastica dei sedimenti coesivi, pari a circa il 15% della compattazione totale avvenuta (il rimanente 85% è irreversibile) fu di circa 2 cm nel centro storico ed era stato previsto dal modello matematico di simulazione del fenomeno (G. GAMBOLATI et al. [13]).

Il comportamento altimetrico del suolo nelle sue fasi negative, di quiescenza e di recupero è stato inoltre verificato mediante il confronto delle differenze dei livelli marini medi di Venezia rispetto a quelli delle stazioni mareografiche della costa altoadriatica ritenuta stabile di massima (Trieste, Rovigno e Buccari).

Considerata la fragilità ambientale di Venezia e il fatto che vive nell'acqua, la valutazione della riduzione altimetrica complessiva del suolo va riferita al livello del mare e deve quindi tener conto non solo del processo di subsidenza indotta dall'estrazione intensiva di acque artesiane, bensì, come precedentemente accennato, anche di quello dovuto alla componente di subsidenza naturale e dell'aumento eustatico del livello del mare.

In funzione dell'evoluzione temporale dei processi naturali e dei valori in gioco si è ritenuto lecito estrapolare linearmente i tassi di 0.4 mm/anno per la subsidenza naturale e di 1.27 mm/anno per l'eustatismo all'intero periodo 1908-1975. Per la componente antropica della subsidenza viceversa se ne è considerata l'incidenza dall'inizio del fenomeno (1930), con trend diversi, incluso il *rebound*.

In conclusione, riferendosi allo zero mareografico del 1908 i tre processi hanno congiuntamente «abbassato» il suolo cittadino di circa 22 cm rispetto al livello dell'acqua. Questo valore, altrove trascurabile, rappresenta una grave penalizzazione per Venezia che si eleva mediamente di 1 m sul medio mare (Piazza San Marco, area di primaria importanza monumentale, si trova a quote decisamente inferiori). In altre parole, come conseguenza

della perdita altimetrica di 22 cm, è sensibilmente aumentata la frequenza degli eventi di acqua alta; è facile dimostrare infatti che oggi sono annoverati fra le acque alte quei livelli di marea che all'inizio del secolo non avrebbero allagato la città (P. GATTO e L. CARBOGNIN [15]).

2.2. Evoluzione altimetrica 1973-1993.

Una volta verificato l'arresto del processo antropico di subsidenza, mentre i controlli di campagna delle quote piezometriche sono stati regolarmente eseguiti negli anni da parte del C.N.R. (R. DAZZI et al. [12, 10, 11]), i rilievi altimetrici, effettuati da Enti diversi, sono stati viceversa più sporadici e parziali (questo anche per la limitata disponibilità finanziaria).

Solo nel 1993 è stato possibile eseguire una livellazione di alta-altissima precisione che, seguendo le linee Treviso-Mestre-Venezia centro storico e circumlagunare (Fig. 3), effettua lo stesso percorso della livellazione 1973 C.N.R., l'ultima che abbia coperto l'intero comprensorio⁽²⁾.

Il confronto dell'altimetria attuale con quella del 1973, permette di fare un'analisi completa sulla subsidenza esplicitasi nel territorio veneziano negli ultimi vent'anni.

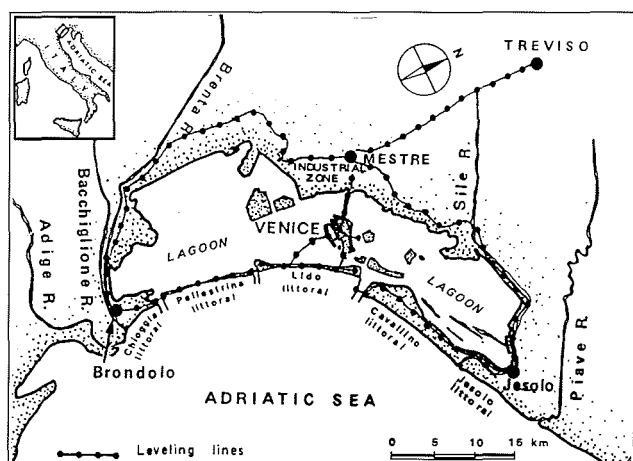


Fig. 3 - Percorso delle linee di livellazione 1993.

Illustration of the leveling lines surveyed in 1993.

Una prima visione sinottica del fenomeno ci è fornita dalla mappa delle isocinetiche 1973-1993, ricostruita con il metodo di interpolazione stocastica del Kriging (A. BERGAMASCO et al. [1]) per l'intero comprensorio (Fig. 4).

Appare evidente che esiste un'area stabile, comprendente le zone di terraferma da Treviso a Mestre, quelle di gronda nonché il centro storico, e un'area più propriamente lagunare-litorale dove l'abbassamento del suolo non è trascurabile benché i tassi di subsidenza relativi al periodo 1973-1993 non siano paragonabili per gravità a quelli del precedente ventennio critico '50-'70.

Un riassunto numerico dei dati altimetrici 1973-1993 è riportato in Tabella 1.

Per analizzare con maggior dettaglio la situazione altimetrica relativa a singole linee di livellazione o specifiche località si sono prodotti diversi profili altimetrici.

In Figura 5 è riportata l'altimetria del percorso Treviso-Venezia (Punta della Dogana) che, per un confronto temporale completo, ha come base di riferimento le quote della livellazione del 1952. Si può osservare come l'altimetria del 1993 ricalchi grossomodo quella del 1973 a dimostrazione che queste aree non sono più subsidenti. In particolare nel tratto Treviso-Mestre l'abbassamento medio annuo del periodo 1973-1993 è stato di 0.3 mm/anno e lungo la linea che attraversa il centro storico la media è addirittura positiva indicando così la totale stabilità del suolo di queste zone.

TABELLA 1. -Statistiche elementari della subsidenza del periodo 1973-1993.

Elementary statistics of the 1973-1993 land subsidence.

LINEE DI LIVELLAZIONE	SUBSIDENZA (cm) 1973-1993			
	VALORE MEDIO	MEDIA ANNUA	VALORI MASSIMI	VALORI MINIMI
TREVISIO-MESTRE	-0.55	-0.03	-2.90	0.39
MESTRE-VENEZIA	0.27	0.01	-0.91	1.62
VENEZIA (centro storico)	0.30	0.02	-3.58	1.64
MESTRE-BRONDOLO	-1.51	-0.08	-10.04	1.93
MESTRE-JESOLO	-2.04	-0.12	-7.97	0.30
LITORALE-DI CHIOGGIA	-3.08	-0.15	-4.78	-1.83
LIT. DI PELLESTRINA	-3.01	-0.15	-5.93	-0.95
LITORALE DI LIDO	-2.49	-0.12	-4.45	-0.21
LIT. CAVALLINO-JESOLO	-4.44	-0.22	-0.47	-0.10

(2) La livellazione 1993 è stata eseguita nell'ambito delle ricerche finanziate dal «Progetto Sistema Lagunare Veneziano», Linea di Ricerca 2.7: «Modelistica della Subsidenza Veneziana», responsabile Dott.ssa Laura Carbognin.

La livellazione ha quotato anche la linea Conegliano-Treviso-Venezia con partenza e percorso del rilievo 1975 permettendo un più completo confronto e la verifica della stabilità del caposaldo di partenza a Treviso (L. CARBOGNIN et al. [9]).

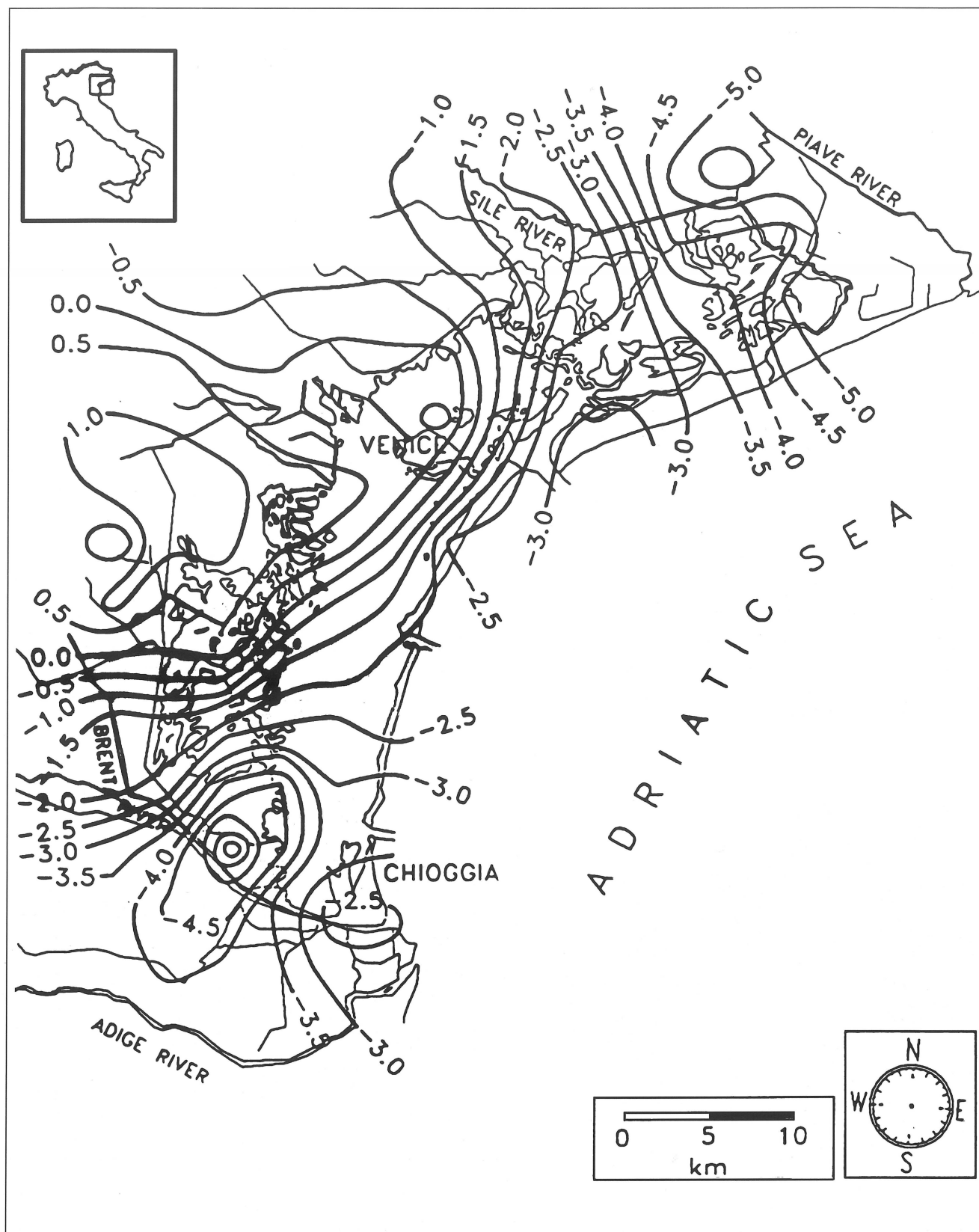


Fig. 4 - Mappa della subsidenza 1973-1993 nel comprensorio lagunare (scala in cm) (da L. CARBOGNIN et al. [9]).

Contour lines of equal subsidence 1973-1993 of the whole lagoon surface and the Venice hinterland (scale in cm) (L. CARBOGNIN et al. [9]).

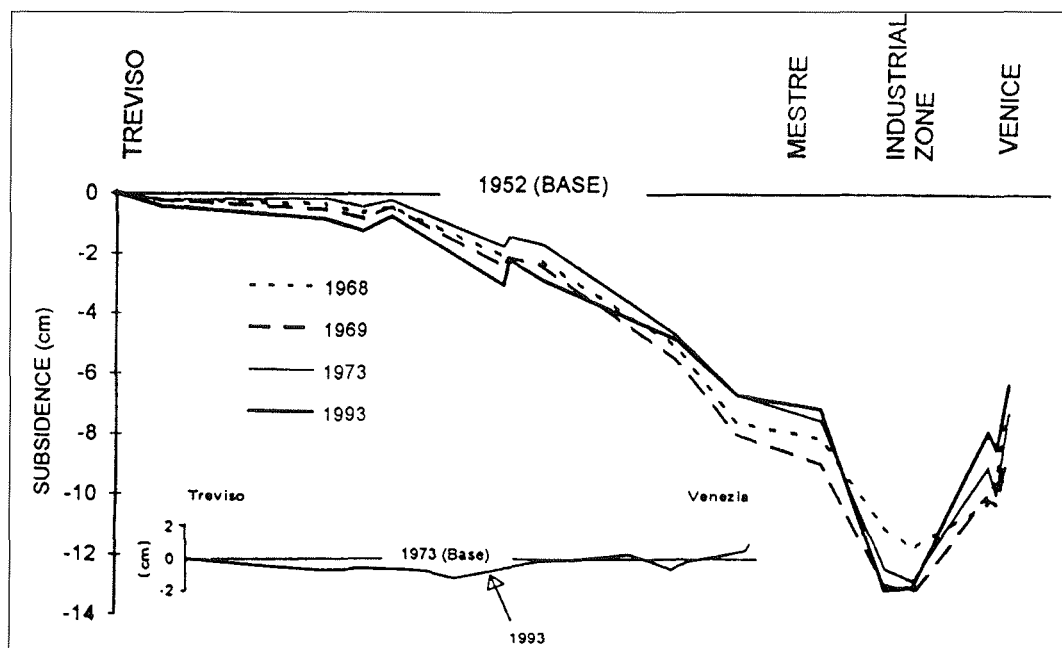


Fig. 5 - Grafico comparativo dell'altimetria da Treviso a Venezia (P.ta della Dogana) dal 1952 (base) al 1993.

Ground elevation along the leveling line from Treviso to Venice (P.ta della Dogana) from 1952 (base) up to 1993.

Resta comunque la depressione altimetrica precedentemente formatasi con apice nella zona industriale, a comprova della quasi totale irreversibilità della compattazione dei diaframmi argillosi che si misura in superficie come subsidenza.

A Venezia, che per importanza e precarietà è sempre stata l'area più studiata e controllata, esiste una fitta rete di capisaldi (123 su 8 Km², 65 dei quali confrontabili sin dal 1961) che ha permesso di delineare con enorme dettaglio la situazione altimetrica cittadina.

Le linee di isosubsidenza relative al ventennio 1973-1993, confrontate con quelle del periodo più critico 1961-1969 (Fig. 6), confermano la situazione di stabilità del suolo verificata dai rilievi 1973 e 1975 e offrono altresì spunti per interessanti interpretazioni. Innanzitutto i valori di subsidenza relativi all'area più prossima alla terraferma evidenziano, per il primo periodo, il coinvolgimento del centro storico nel cono di abbassamento della zona industriale; tuttavia nella stessa zona occidentale (Marittima-Tronchetto) e in quella orientale (S. Elena-Giardini), entrambe di recente interramento, si riscontra ancora nel secondo periodo, un locale abbassamento che induce a ritenere che questi terreni non si siano ancora completamente consolidati. Questo processo di consolidazione che indubbiamente si esplicava anche in passato, venne assorbito nel periodo critico dal più consistente processo indotto. Abbassamenti ancora più localizzati, sia pure di scarsa entità, sono misurati attorno ad alcuni canali principali ad indicare, secondo gli Autori, l'influenza delle correnti che possono qui indurre modesti fenomeni erosivi.

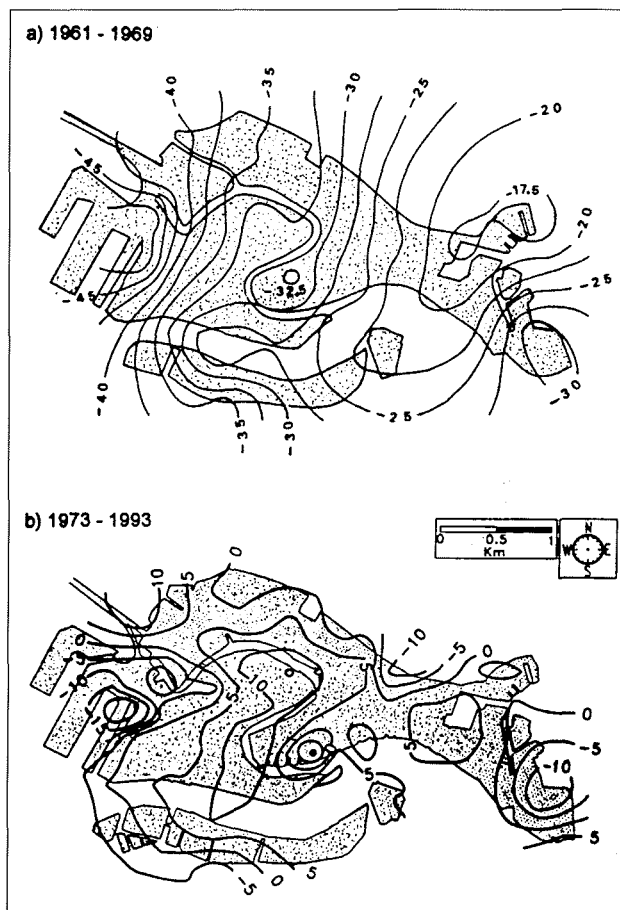


Fig. 6 - Subsidenza a Venezia: mappa delle isocinetiche (scala in mm) a) 1961-1969 e b) 1973-1993.

Contour lines of the subsidence in Venice (scale in mm): a) 1961-1969 and b) 1973-1993.

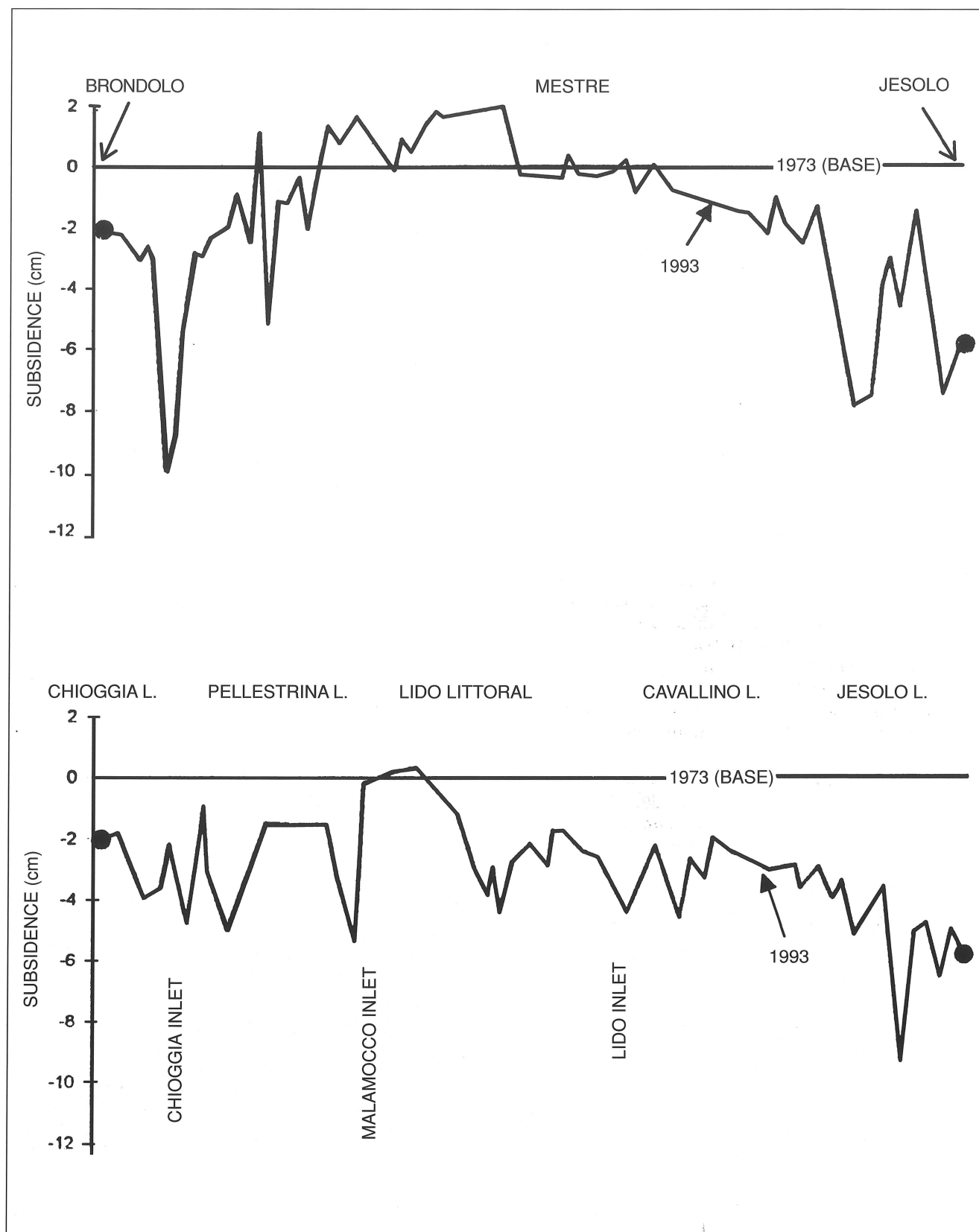


Fig. 7 - Profilo altimetrico 1973-1993 delle linee di livellazione circumlagunari e litoranee.

Ground elevation behaviour between 1973 and 1993 along the leveling lines around the lagoon and the Venetian littoral.

Resta comunque il fatto che la subsidenza non è più oggi «il problema ambientale» di Venezia, benchè la città subisca tuttora gli effetti prodotti sulla sua già precaria situazione dal passato sprofondamento.

Si era precedentemente messa in risalto la presenza nel comprensorio di due aree a diverso comportamento altimetrico (Fig. 4). Una evidenza più immediata di questa affermazione è riscontrabile dai grafici relativi alle linee di livellazione circumlagunari (Fig. 7). L'andamento dell'altimetria 1993 riferita a quella del 1973 dimostra come procedendo sia da Mestre a Jesolo (circumlagunare Nord) che da Mestre a Brondolo (circumlagunare Sud) (v. Fig. 3) si passi gradualmente a valori di subsidenza negativa con comportamento analogo, e come questo abbassamento interessi anche l'intero tratto costiero (da Brondolo-Chioggia ai litorali di Cavallino e Jesolo) con valori grossomodo comparabili. Non si evidenzia cioè un trend diverso per i singoli cordoni litoranei dove mediamente i valori di abbassamento sono analoghi malgrado la variabilità delle quote dei singoli capisaldi (Tab. 1). Fanno eccezione a questo andamento il litorale di Lido, in parte stabile per le ragioni che vedremo più avanti, e il tratto di costa della zona di Jesolo, che appartiene più propriamente all'estremo bordo lagunare Nord, decisamente più subsidente, che non al litorale veneziano vero e proprio che termina al Cavallino.

Prima di esporre le cause di questa situazione si ritiene opportuno giustificare la presenza di isolati picchi di subsidenza, più o meno importanti, sia lungo il bordo lagunare che lungo i litorali. I primi, rilevabili alle estremità lagunari prossime ai litorali, sono imputabili a sfruttamenti artesiani molto localizzati, i secondi a situazioni particolari quali i dissesti delle strutture foranee alle bocche di porto in atto al momento della misura (lavori di ripristino e consolidazione dei moli sono oggi in corso).

2.3 Analisi causa-effetto

A parte situazioni di sfruttamenti artesiani circoscritti, non esiste oggi nel territorio alcun cono di depressione piezometrica arealmente esteso che coinvolga anche altre zone a ridotta attività estrattiva come succedeva in passato.

In Figura 8 vengono riportate, a titolo di esempio, le superfici piezometriche del IV acquifero per gli anni 1973, 1983 e 1993. La prima mostra come il cono di depressione provocato dai forti emungimenti industriali sia ancora presente malgrado il ravvenamento in atto delle falde sfruttate; le due successive evidenziano la normalizzazione della situazione con la presenza di carichi idraulici positivi.

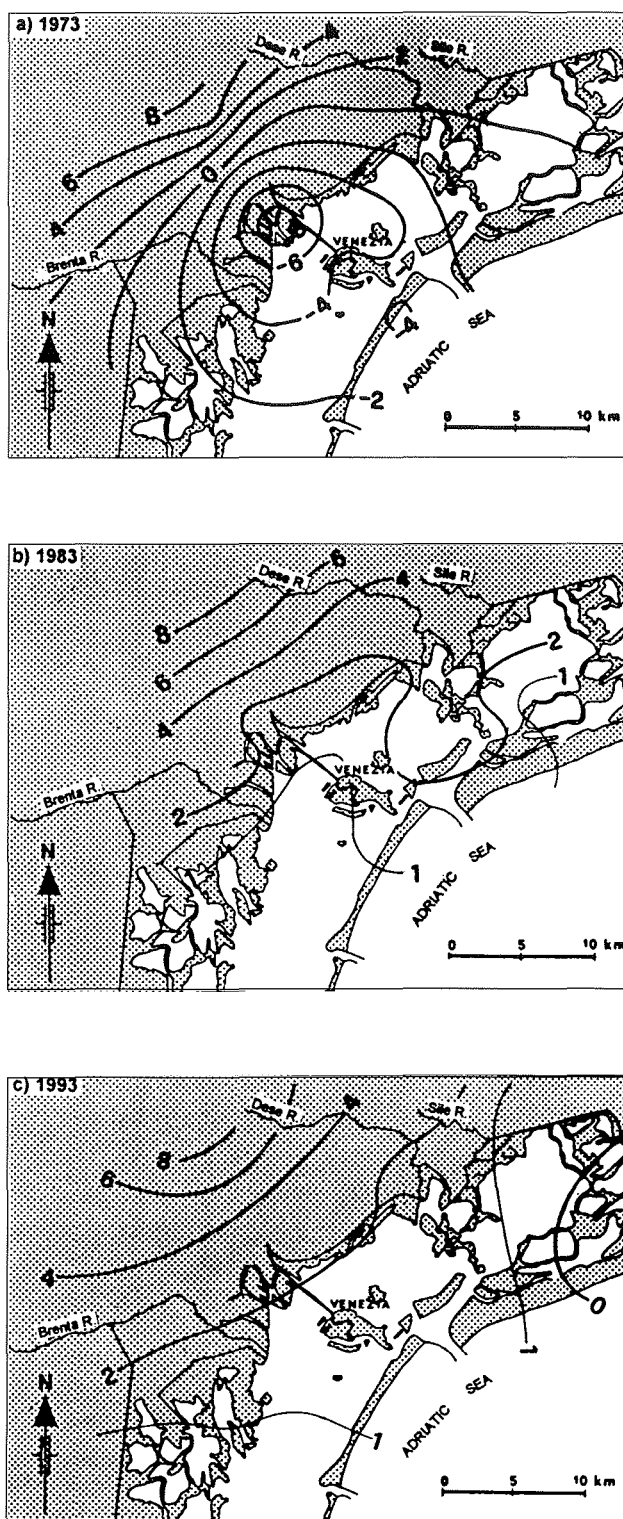


Fig. 8 - Evoluzione della superficie piezometrica (metri sul l.m.m.) del quarto acquifero nell'area veneziana (1973 da L. CARBOGNIN e G. VOLPI [4]; 1983 da MARAFFI C. et al. [16]; 1993 ricostruita dagli Autori sulla base dei dati pubblicati da R. DAZZI et al. [10]).

Evolution of the piezometric surface of 4th aquifer in the Venetian area. Equipotential lines are given in meters a.s.l. (Maps: 1973 after L. CARBOGNIN e G. VOLPI [4]; 1983 after MARAFFI C. et al. [16]; 1993 drawn by the Authors using data after R. DAZZI et al. [10]).

Va rilevato però che all'estremo settentrionale della laguna (bordo lagunare Nord e Jesolo) la pressione dell'acquifero ha subito una lieve diminuzione nel 1993 rispetto al 1983, pur mantenendosi ad un livello uguale o superiore a quello del piano campagna; anche nel bordo lagunare Sud, non rappresentato in figura, le quote piezometriche del 1993 (R. DAZZI et al. [10]) indicano una depressione non trascurabile trovandosi qui sotto il piano campagna.

Escludendo dunque un abbassamento generalizzato del suolo indotto da intensivi pompaggi di acque artesiane, si può dire che la fenomenologia in esame per gli ultimi vent'anni è quella naturale.

In particolare si è confermata l'esiguità del tasso evolutivo naturale precedentemente valutato di 0.4 mm/anno (valore medio) nella zona di Venezia e di terraferma. Più attivo, viceversa, è emerso essere il processo alle estremità lagunari Nord e Sud e lungo i litorali.

Bisogna tener conto delle vicende evolutive della laguna dopo la sua formazione e del fatto che le aree in questione hanno beneficiato fino ad un recente passato di cospicui apporti solidi fluviali, grazie alla posizione delle foci ai bordi del bacino, e che in misura ridotta ne sono interessate ancora oggi; è facile dimostrare quindi che per questi sedimenti di recente deposizione la fase di consolidazione naturale è più attiva che altrove e che quindi i tassi di subsidenza risultano qui più elevati.

Inoltre, anche i tratti estremi del litorale lagunare, ossia Chioggia e Cavallino, hanno fortemente risentito della vicinanza delle fonti di alimentazione dei fiumi Brenta e Piave rispettivamente, tanto da modificare la loro posizione nel tempo che è notevolmente avanzata con deposizioni via via più recenti (P. GATTO [14]). Solo il tratto mediano del litorale (Lido e parte Pellestrina), non influenzato dagli apporti fluviali diretti, ha grossomodo mantenuto la sua configurazione nel tempo e quindi la consolidazione naturale di questi sedimenti sembra essere oggi più matura rispetto a quella degli altri cordoni litorali e di conseguenza il tasso di subsidenza è inferiore qui che negli altri tratti costieri.

3. OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

Lo studio dell'evoluzione altimetrica del comprensorio veneziano negli ultimi vent'anni ha permesso di definire e quantificare in modo più preciso la subsidenza naturale che si esplica in modo differenziale nel territorio in esame.

Questo è stato possibile grazie al fatto che, rimossa la causa, non è più attiva la componente della subsidenza per estrazione intensiva di acque sotterranee e che l'arco di tempo considerato è sufficientemente significativo per valutare la subsidenza geologica in atto.

Il confronto dei risultati della livellazione 1993 con quelli dell'analogo rilievo geodetico 1973 ha evidenziato una linea ideale di demarcazione che separa due zone a differente comportamento di subsidenza. La prima include le aree di terraferma e quelle di gronda lagunare ad essa più prossime nonché la stessa città di Venezia; la seconda comprende le zone alle estremità lagunari Sud e Nord e i litorali, cioè quelle di più recente formazione.

In particolare nel centro storico si è confermata la stabilità del suolo definitivamente accertata nel 1973. Solo modesti e molto localizzati abbassamenti (0.3÷0.7 mm/anno) sono presenti nelle più recenti aree cittadine orientali (S. Elena-Giardini) e occidentali (Marittima-Tronchetto) ottenute per interrimento dalla fine del secolo scorso fino ai primi decenni del '900 e che hanno dato al centro storico la sua attuale configurazione. È indubbio che in queste zone il processo di compattazione è ancora in atto e se ne può oggi misurarne l'entità dato che non è più assorbito da quello più consistente indotto dalle depressioni piezometriche.

Abbassamenti ancora più ridotti, sia per estensione che per magnitudo, sono ubicati lungo alcuni canali principali e sono stati attribuiti a fenomeni erosivi indotti da possibili variazioni di velocità della corrente.

Nelle aree più subsidenti, quelle che insistono sui bordi lagunari estremi e lungo i litorali, il tasso medio di subsidenza risulta compreso tra 1 e 2 mm/anno. Questi valori sono in accordo con quelli tipici dei sedimenti di recente deposizione quali quelli in esame che proparte appartengono alle formazioni deltizie di Sile e Piave a Nord e Brenta, Adige a Sud.

Picchi di subsidenza arealmente limitati sono ascrivibili a circoscritte estrazioni di acque artesiane.

Per quanto riguarda i litorali, prescindendo dai problemi erosivi in atto indotti dagli estesi interventi antropici operati soprattutto dalla fine del secolo scorso (smantellamento di apparati dunali, costruzione di moli foranei incompatibili col regime costiero, etc.) (P. GATTO [14]) è stato dimostrato che la subsidenza ha concorso ad aggravare la precarietà litoranea innescando un pericoloso processo di approfondimento dei fondali sottocosta.

Questo fenomeno, evidente soprattutto nel periodo di massima subsidenza, è particolarmente avvertito nei tratti costieri protetti dai murazzi che, operando da barriera fissa impediscono che l'azione erosiva del mare si espliciti sulla spiaggia emersa (L. CARBOGNIN et al. [5, 7]).

Anche negli ultimi vent'anni comunque, benché i valori in gioco siano modesti, si è verificato che in corrispondenza dei punti di maggiore subsidenza corrisponde una certa destabilizzazione del litorale sommerso con un lieve incremento della pendenza media.

LAVORI CITATI

- 1 - BERGAMASCO A., TEATINI P., CARBOGNIN L. (1993): *Confronto critico tra Kriging e analisi oggettiva*. Il Nuovo Cimento 16 (3) 289-302.
- 2 - BORTOLAMI G., CARBOGNIN L., GATTO P. (1985): *The natural subsidence in the Lagoon of Venice, Italy*. In: Land Subsidence (ed. by A.I. Johnson, L. Carbognin, L. Ubertini) (Proc. 3rd International Symp. on Land Subsidence, Venice (Italy) March 1984), 777-785, IAHS Publ. N. 151.
- 3 - CAPUTO M., FOLLONI G., GUBELLINI A., PIERI L., UNGUENDOLI M. (1972): *Survey and geometric analysis of subsidence in the region of Venice and its hinterland*. Tech. Report no. 9, CNR-Lab. Studio Dinamica Grandi Masse, Venezia.
- 4 - CARBOGNIN L., VOLPI G. (1980): *Ricostruzione automatica di grandezze ambientali nel comprensorio veneziano*. Geologia Tecnica, XXVII, 4, 5-16.
- 5 - CARBOGNIN L., GATTO P., MARABINI F. (1985): *Erosive process in the littoral of the Venice Lagoon (Italy)*. In: Coastal Zone 85 (ed. by Orville T. Magoon, Hugh Converse, Dallas Miner, Delores Clark and L. Thomas Tobin) (Proc. of the Fourth Symp. on Coastal and Ocean Management, Baltimore (MD-USA) July 1985), 2,1587-1600, Publ. ASCE.
- 6 - CARBOGNIN L., GATTO P., MOZZI G., (1981): *La riduzione altimetrica del territorio veneziano e le sue cause*. Istituto Veneto di Lettere Scienze ed Arti, Rapporti e Studi, VIII, 55-83.
- 7 - CARBOGNIN L., MARABINI F., TOSI L. (1995): *Land subsidence and degradation of the Venetian littoral*. In: Land Subsidence (ed. F. Barends, F. Brower, F. Schröder) (Proc. 5th Int. Symp. on Land Subsidence, The Hague, The Netherlands, Oct. 1995) 391-403, IAHS Publ. N. 254.
- 8 - CARBOGNIN L., GATTO P., MOZZI G., GAMBOLATI G., RICCI G. (1977): *New trend in the subsidence of Venice*. In: Land Subsidence (ed. by J.C. Rodda) (Proc. 2nd International Symp. on Land Subsidence, Anaheim (CA-USA) December 1976) 65-81, IAHS Publ. N. 121.
- 9 - CARBOGNIN L., MARABINI F., TARONI G., TEATINI P., TOSI L. (1994): *Altimetria recente del comprensorio lagunare veneziano. Un'analisi critica*. Tech. Report no. 193, CNR, ISDGM, Venezia.
- 10 - DAZZI R., GATTO G., MOZZI G., ZAMBON G. (1994a): *La rete di monitoraggio delle pressioni di strato*, parte seconda in: Lo sfruttamento degli acquiferi artesiani di Venezia e i suoi riflessi sulla situazione altimetrica del suolo. Progetto Sistema Lagunare Veneziano, Linea di Ric. 2.8, CNR, ISDGM, Venezia.
- 11 - DAZZI R., GATTO G., MOZZI G., ZAMBON G. (1994b): *Andamento evolutivo delle pressioni di strato*, parte terza in: Lo sfruttamento degli acquiferi artesiani di Venezia e i suoi riflessi sulla situazione altimetrica del suolo. Progetto Sistema Lagunare Veneziano, Linea di Ric. 2.8, CNR, ISDGM, Venezia.
- 12 - DAZZI R., GATTO G., MOZZI G., RUSCONI A., ZAMBON G. (1988): *Rete idrometrografica per il controllo delle pressioni di strato degli acquiferi sotterranei di Venezia e del suo entroterra*. Gruppo Naz. Dif. Cat. Idrogeol.-Progr. Spec. SCAI, Pubbl. n. 130, Venezia.
- 13 - GAMBOLATI G., GATTO P., FREEZE R.A. (1974): *Mathematical simulation of the subsidence of Venice*. 2. Results. Water Resour. Res. 10, (3) 563-577.
- 14 - GATTO P. (1984): *Il cordone litoraneo della laguna di Venezia e le cause del suo degrado*. Istituto Veneto di Lettere Scienze ed Arti, Rapporti e Studi, IX, 163-193.
- 15 - GATTO P., CARBOGNIN L. (1981): *The Lagoon of Venice; natural environmental trend and man-induced modification*. Hydrol. Sci. Bull. 26 (4), 379-391.
- 16 - MARAFFI C., MOZZI G., POSOCCO F., RUSCONI A., SALZANO E., SANTANGELO R., SORTINO L., ZANETTI L. (1985): *Venice today*. In: Land Subsidence (ed. by A.I. Johnson, L. Carbognin, L. Ubertini) (Proc. 3rd International Symp. on Land Subsidence, Venice (Italy) March 1984), 329-336, IAHS No. 15.